

采用发射极非均匀指间距技术改善功率异质结双极晶体管热稳定性的研究^{*}

陈亮[†] 张万荣 金冬月 谢红云 肖盈 王任卿 丁春宝

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2010年8月26日收到; 2010年10月12日收到修改稿)

为了提高多发射极功率异质结双极晶体管的热稳定性, 本文利用耦合热阻表征发射极指间距变化对发射极指间热耦合作用的影响, 得到了耦合热阻与发射极指间距之间的变化关系, 提出了发射极非均匀指间距技术. 通过热电反馈模型对采用发射极非均匀指间距技术的功率 HBT 进行热稳定性分析, 得到了多发射极指上的温度分布. 结果表明, 多发射极 HBT 在采用非均匀发射极指间距技术后, 峰值温度明显下降, 温度变化幅度更加平缓, 有效地提高了器件的热稳定性.

关键词: 异质结双极晶体管, 耦合热阻, 指间距

PACS: 85.30.De, 72.15.Jf, 44.10.+i

1. 引言

随着异质结双极晶体管 (HBT) 越来越多地被应用于功率放大器、射频/微波通信和卫星通信等领域, 其自身的热稳定性变得尤为关键^[1-6]. 尽管 HBT 具有良好的功率特性, 但是靠单指晶体管提供高功率输出时, 会导致 HBT 晶格温度的严重上升. 这种由每个发射极指的耗散功率所引起的晶体管温度上升的机理叫做自加热效应. 为了减小自加热效应, 同时增加 HBT 的功率处理能力, 人们经常采用多发射极指等间距并联结构. 同时, 多发射极指结构还可以减少沿发射极指长方向的信号异相延迟时间. 但是多发射极指结构也使热传导方式变得更复杂, 除了发射极本身自加热效应外, 相邻发射极指之间的热耦合作用会造成温度分布的不均匀, 这种效应称为热耦合效应. 器件的相邻发射极指间的热耦合效应将导致器件中心发射极指温度较高, 又由于器件发射极电流具有正温度系数, 中心指将传导更多的电流, 产生更多的热, 最终可能产生局部热斑, 甚至热烧毁. 特别地, 随器件尺寸的不断缩

小, 随现行 SOI 技术的不断采用, 介质在器件深槽隔离技术中的不断应用, 都使得热阻不断增加, 进一步加剧了热耦合效应对器件的影响, 严重限制了 HBT 高功率处理能力. 热阻包含自热热阻与耦合热阻, 耦合热阻表征了晶体管相邻发射极指间热耦合作用的强弱^[7-11], 并且正是耦合热阻导致了器件各发射极指上温度分布的不均匀. 耦合热阻主要受发射极指间距的大小影响, 但是发射极指之间耦合热阻大小随发射极指间距变化关系尚未给出^[12-16]. 同时, 如果片面地加大发射极指间距无疑会加大器件面积.

本文提出了发射极非均匀指间距技术来提高多发射极功率异质结双极晶体管的热稳定性. 在保持总的发射极指间距不变的情况下, 通过发射极非均匀指间距技术调节发射极指间的热耦合作用, 降低了功率 HBT 最高结温, 改善了功率 HBT 的温度分布, 有效地提高了器件的热稳定性.

2. 理论模型

图 1 给出了发射极功率 SiGe HBT 的器件结构示意图, 每一个发射极指指长为 l ($20\ \mu\text{m}$)、指宽为

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60776051, 61006059, 61006044), 北京市自然科学基金 (批准号: 4082007), 北京市教委科技发展计划 (批准号: KM200710005015, KM200910005001) 和北京市属市管高等学校人才强教计划 (批准号: 00200054RA001) 资助的课题.

[†] E-mail: 30750574@163.com

$w(2\ \mu\text{m})$, 相邻发射极指的间距为 s .

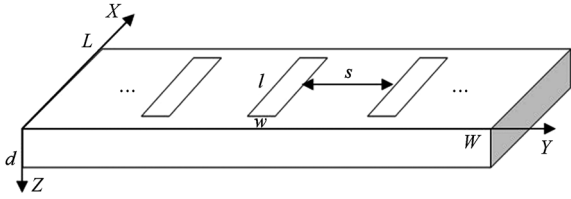


图1 发射极功率 SiGe HBT 示意图

考虑热导率随温度改变而发生变化时, 稳态的热传导方程为

$$\nabla[k_{\text{th}}(T) \nabla T] = 0, \quad (1)$$

边界条件为

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0, W} = 0, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0, L} = 0, \quad (3)$$

$$k_{\text{th}}(T) \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = -\frac{P_k}{l \cdot w}, \quad (4)$$

$$T|_{z=d} = T_0, \quad (5)$$

$k_{\text{th}}(T)$ 为随温度变化的硅材料的热导率, T_0 为环境温度. $k_{\text{th}}(T)$ 的表达式为^[17]

$$k_{\text{th}}(T) = k_{\text{th}0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1.24}, \quad (6)$$

$k_{\text{th}0}$ 为环境温度为 300 K 时衬底材料的热导率, P_k 为第 k 个发射极指上的耗散功率.

因为发射极结面积与芯片面积相比很小, 且我们最关心的是发射极指上的峰值温度(位于每一个发射极指中心), 因此我们将每一个发射极指上的峰值温度视为发射极指上的温度. 第 k 个发射极指上的集电极电流密度 J_{ck} 与发射结电压 V_{BE} 及温度 T 的关系为

$$J_{ck} = J_{c0} \exp \left\{ \frac{1}{k_0 T_0 / q} [V_{\text{BE}} - l w J_{ck} R_{\text{Ek}} (\beta_k + 1) / \beta_k - \phi T(x_k, y_k, 0) + \phi T_0] \right\}, \quad (7)$$

J_{c0} 为发射极电流饱和密度, ϕ 为发射结电压反馈系数, R_{Ek} 为发射极接触电阻, β_k 为电流增益.

第 k 个发射极指上的耗散功率 P_k 为

$$P_k = J_{ck} \cdot V_{\text{CE}} \cdot A_E, \quad (8)$$

A_E 为发射极面积.

利用(1)–(8)式, 采用自洽迭代法, 首先假定功率 HBT 每个发射极上的集电极电流密度均匀分配, 设第 k 个发射极上对应的集电极电流密度为

J_{ck} , 通过电流密度方程可求得各发射极指上相应的耗散功率 P_k , 再把得到的 P_k 代入热传导方程求得有源区上的温度 T , 然后把 T 代入电流密度方程再求 J_{ck} , 如此反复迭代, 直到 T 自洽(其变化量小于 0.01 K)为止, 这时可以得到芯片表面的稳态温度场分布.

单一发射极指的情况下, 根据自热热阻计算公式

$$R_{\text{th}} = \frac{T - T_0}{P}, \quad (9)$$

可以求得自热热阻 R_{th} , T 为峰值温度, P 为耗散功率.

在多个发射极指的情况下, 每一个发射极指上的温度是由自加热效应与热耦合效应共同作用所产生, 第 k 个发射极指上的温度可以定义为

$$T_k = T_0 + P_k R_{\text{th}} + \sum_{j=1, j \neq k}^n P_j R_{\text{thc}, k, j}, \quad (10)$$

其中, $R_{\text{thc}, k, j}$ 为第 j 个发射极指与第 k 个发射极指间的耦合热阻, 其反映了热耦合作用的程度.

3. 结果与讨论

利用(9)与(10)式, 当单发射极指耗散功率为 0.4 W 时, 不同发射极指间距下相邻发射极指间的耦合热阻被求得, 如图 2 所示. 当发射极指间距较小时(尤其是指间距小于 $5\ \mu\text{m}$ 时), 相邻的两个发射极指间的热量不易散发, 引起相邻发射极指中心区域集中了大量的热, 导致发射极指上温度较高, 耦合热阻值随发射极指间距的减小迅速变大. 较大的发射极指间距无疑会具有较小的耦合热阻, 当然也就具有较好的热稳定性, 但是当发射极指间距过大时, 耦合热阻值基本不随发射极指间距的变化而发生变化, 晶体管相邻发射极指间的热耦合很松懈, 即耦合热阻接近于零, 结果某个发射极指上的功率不会引起与它相邻的发射极指上的升温.

对于传统的多发射极指等间距并联设计, 由于中心区域发射极指的耦合热阻明显高于两侧区域发射极指的耦合热阻, 所以中心区域发射极指上的温度分布明显高于两侧发射极指上的温度, 温度分布很不均匀. 利用之前所讨论的耦合热阻随发射极指间距的变化趋势, 我们增大中心区域相邻发射极指间距(即减小耦合热阻)以改善温度分布的均匀性, 增强器件的热稳定性. 同时考虑到两侧发射极指的温度明显低于中心区域发射极指上的温度, 因此减小两侧发射极指间距以保证总的发射极指间

距保持不变. 图3给出了具有传统均匀发射极指间距的5指功率HBT(相邻指间距均为 $20\text{ }\mu\text{m}$)与具有非均匀发射极指间距5指功率HBT(从左到右指间距分别为 $14.5\text{ }\mu\text{m}$, $25.5\text{ }\mu\text{m}$, $25.5\text{ }\mu\text{m}$, $14.5\text{ }\mu\text{m}$)在相同功率(2 W)条件下的温度分布曲线. 可以清楚地看出, 采用发射极非均匀指间距结构功率HBT的各发射极之间的温度差异仅为 7 K , 而传统均匀发射极指间距结构功率HBT的各发射极指间温度差异高达 49 K . 另外, 采用非均匀发射极指间距的SiGe HBT的最高结温为 421.44 K , 与均匀发射极指间距的SiGe HBT相比下降了 16 K . 因此采用非均匀发射极指间距结构后, 整体温度变化幅度更加平缓, 有效地提高了器件的热稳定性.

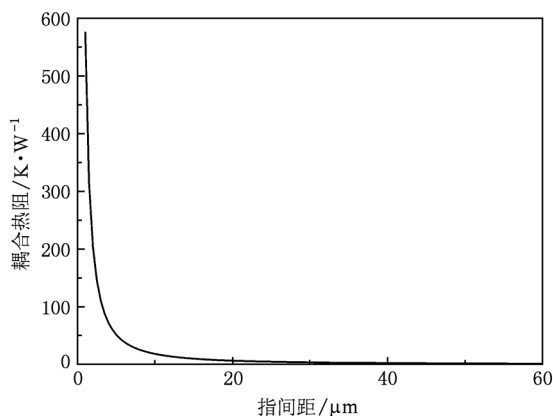


图2 耦合热阻随发射极指间距的变化曲线

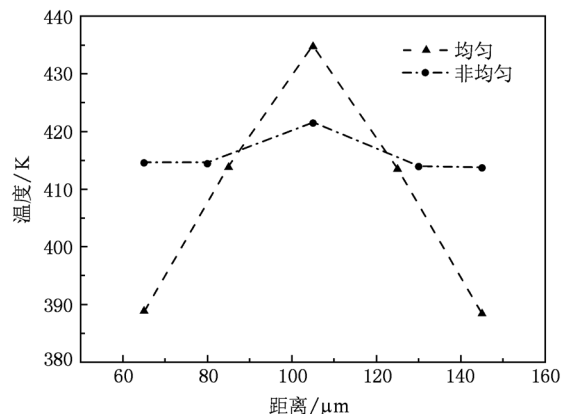


图3 均匀指间距与非均匀指间距功率SiGe HBT温度分布

4. 器件制备与实验结果

为了改善温度分布的均匀性, 增强器件的热稳定性, 我们参照图2所给出的耦合热阻与发射极指间距的关系, 设计(增大中心区域相邻发射极指间距, 减小两侧发射极指间距)并制造出了具有非均匀指间距结构的功率SiGe HBT. 图4给出了多发发射极指功率SiGe HBT的截面图. 为便于对比, 我们同时制作出了20指均匀指间距功率SiGe HBT, 其中均匀指间距功率SiGe HBT的相邻发射极指间距均为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 非均匀指间距功率SiGe HBT由两侧到中

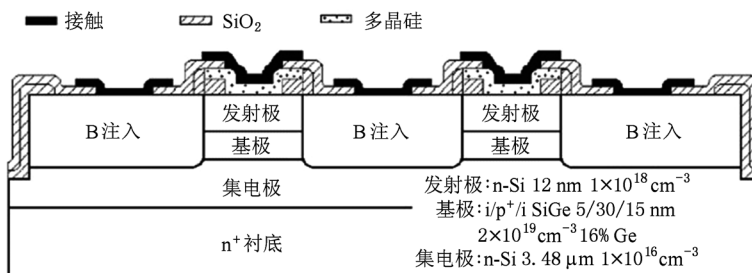


图4 多发发射极指功率SiGe HBT的截面图

心相邻发射极指间距依次为 $16\text{ }\mu\text{m}$, $16\text{ }\mu\text{m}$, $18\text{ }\mu\text{m}$, $18\text{ }\mu\text{m}$, $20\text{ }\mu\text{m}$, $20\text{ }\mu\text{m}$, $22\text{ }\mu\text{m}$, $22\text{ }\mu\text{m}$, $24\text{ }\mu\text{m}$, $28\text{ }\mu\text{m}$ (由于对称性, 因此仅需设计10个发射极指间距). 均匀指间距与非均匀指间距功率SiGe HBT均具有相同的单一发射极指面积($3\text{ }\mu\text{m} \times 45\text{ }\mu\text{m}$), 并且具有相同的发射极指总间距.

图5为均匀指间距与非均匀指间距的多发射极指功率SiGe HBT在相同功率(3.6 W)条件下用红

外热像仪测得的芯片表面温度分布的显微照片. 可以看出, 非均匀发射极指间距的功率SiGe HBT与传统均匀发射极指间距的功率SiGe HBT相比, 芯片表面温度整体下降, 芯片表面温度分布更均匀, 特别是中心区域发射极指上的温差分布均匀性得到了极大改善, 且有源区峰值温度从 403.35 K 降到 386.80 K . 为了证明之前理论分析的合理性与正确性, 我们将发射极非均匀指间距功率SiGe HBT的每

一个发射极指的最高温度(位于发射极指中心处)提取出来,并与理论模拟所得结果进行比较,如图6所示.从图中可以看出,实验结果与模拟结果基本

一致,实验结果很好地验证了我们的模拟结果.因此发射极非均匀指间距技术可以显著改善温度分布的不均性,有效地提高晶体管的热稳定性.

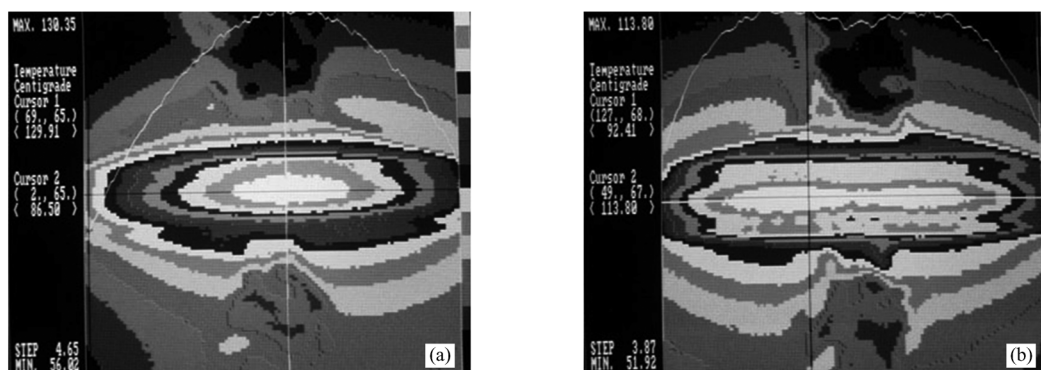


图5 多发射极指功率 SiGe HBT 表面温度分布显微照片 (a)均匀发射极指间距的功率 SiGe HBT; (b)非均匀发射极指间距的功率 SiGe HBT

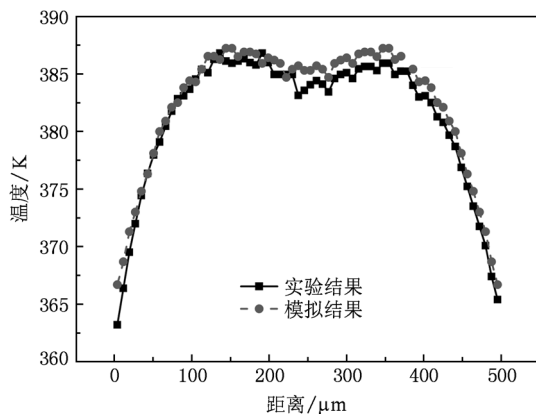


图6 非均匀多发射极指间距功率 SiGe HBT 指中心温度分布

5. 结 论

本文研究了发射极指间距大小对发射极指间热耦合作用的影响,并提出了发射极指间距采用非均匀设计提高功率 HBT 的热稳定性的方法.采用发射极非均匀指间距设计后,整个芯片上的最高结温降低,不同发射极指上的温差下降,特别是中心区域发射极指上的温差分布均匀性得到了极大改善,提高了器件在大功率条件下工作的热稳定性.

- [1] Comeau J P, Najafizadeh L, Andrews J M, Gnana A P, Cressler J D 2007 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **17** 349
- [2] Ma L, Gao Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 303
- [3] Lin G J, Lai H K, Li C, Chen S Y, Yu J Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3479
- [4] Hu H Y, Zhang H M, Dai X Y, Jia X Z, Cui X Y, Wang W, Ou J F, Wang X Y 2005 *Chin. Phys. B* **14** 1439
- [5] Zhou S L, Huang H, Huang Y Q, Ren X M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2890 (in Chinese) [周守利、黄辉、黄永清、任晓敏 2007 物理学报 **56** 2890]
- [6] Cao Y R, Hao Y, Hu S G, Ma X H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 309
- [7] Liou L L, Bayraktaroglu B, Huang C I 1996 *Solid-State Electron* **39** 165
- [8] Zhou W, Sheu S, Liou J J, Huang C I 1998 *Solid-State Electron* **42** 693
- [9] Cao Q J, Zhang Y M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4622
- [10] Lai C J, Li Z H, Li Z J, Zhang B, Zhang Y R 2009 *Chin. Phys. B* **18** 763
- [11] Che Y, Lü H L, Zhang Y M, Zhang Y M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1410
- [12] Olsson J 2001 *Microelectron. Eng.* **56** 339
- [13] Chang Y C, Du G, Song J F, Wang S X, Luo H L, Ge W K, Wang J N, Wang Y 2002 *Solid-State Electron* **46** 1997
- [14] Comeau J P, Najafizadeh L, Andrews J M, Prakash A P G, Cressler J D 2007 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **17** 349
- [15] Adlerstein M G 1998 *IEEE Trans. on Elec. Dev.* **45** 1653
- [16] Liu W, Bayraktaroglu B 1993 *Solid-State Electron* **36** 125
- [17] Maycock P D 1967 *Solid-State Electron* **10** 61

Improvement on thermal stability of power heterojunction bipolar transistor using non-uniform finger spacing^{*}

Chen Liang[†] Zhang Wan-Rong Jin Dong-Yue Xie Hong-Yun Xiao Ying Wang Ren-Qing Ding Chun-Bao

(College of Electronic and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 26 August 2010; revised manuscript received 12 October 2010)

Abstract

One method of non-uniform finger spacing is proposed to enhance thermal stability of multiple finger power heterojunction bipolar transistor. Using coupling thermal resistance to characterize the influence of the change of emitter spacing on thermal coupling, the relation between coupling thermal resistance and emitter spacing is obtained. Temperature distribution on the emitter fingers of multi-finger heterojunction bipolar transistor is studied by a numerical electro-thermal model. The results show that the heterojunction bipolar transistor with non-uniform finger spacing has a smaller temperature difference between fingers than the traditional uniform finger spacing heterojunction bipolar transistor under the same power dissipation. So the method of non-uniform finger spacing is very effective to enhance the thermal stability.

Keywords: heterojunction bipolar transistor, coupling thermal resistance, finger spacing

PACS: 85.30.De, 72.15.Jf, 44.10.+i

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60776051, 61006059 and 61006044), the Beijing Municipal Natural Science Foundation, China (Grant No. 4082007), the Beijing Municipal Education Committee, China (Grant Nos. KM200710005015, KM200910005001), and Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing Municipality (Grant No. 00200054RA0001).

[†] E-mail: 30750574@163.com